

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ТВЕРДЫХ ТЕЛ

Чори Топшулатов Холикович

Ташкентский филиал Самаркандского государственного
университета ветеринарной медицины, животноводства и биотехнологий

Физика магнитных явлений является одной из самых быстроразвивающихся областей физики конденсированного состояния вещества. Это обусловлено как огромной практической значимостью проводимых в этой области исследований, так и необходимостью решения целого ряда фундаментальных проблем, связанных с магнитными свойствами твердых тел.

Introduction

При описании физических свойств твердых тел выделяют три основных типа магнитных эффектов: диамагнетизм, парамагнетизм и ферромагнетизм, обусловленный квантово-механическим взаимодействием между собой магнитных моментов атомов и электронов. Последний включает в себя ставшие уже классическими явления: ферромагнетизм, антиферромагнетизм, ферри магнетизм и ряд таких явлений, как метамagnetизм, суперпарамагнетизм, микромагнетизм и др.

Объяснение многообразия магнитных явлений в твердых телах основывается на двух представлениях. Первое состоит в том, что атомы в твердом теле имеют дискретные микроскопические магнитные моменты. Второе представление основано на существовании взаимодействия между микроскопическими магнитными моментами, причем это взаимодействие отличается от взаимодействия обычных магнитных диполей – оно имеет квантово-механическую природу.

Для понимания основных свойств магнитных материалов воспользуемся следующими представлениями. Элементарным носителем магнетизма является электрон. Рассмотрим пространственное движение электрона вокруг атомного ядра на примере атома водорода. Будем считать для простоты, что движение электрона вокруг протона происходит по круговой орбите. В этом случае движение электрона по орбите можно отождествить с круговым электрическим током. Величину орбитального магнитного момента электрона μ_e можно представить как

$$\mu_e = iS$$

где i – сила тока, создаваемого движущимся по орбите электроном; S – площадь, охватываемая орбитой электрона. Принимая $i = e/T$, где e – заряд электрона, T – период его обращения по орбите, получим

$$\mu_e = \frac{e}{T} \pi r^2 = \pi r^2 = \frac{e}{2m_e} r^2 m_e \omega \quad (1.2)$$

где $\omega = 2\pi/T$ – круговая частота движения электрона по орбите, r – радиус орбиты электрона, m_e – его масса. Величина $m_e r^2 \omega$ есть скалярное значение механического момента количества движения электрона по орбите вокруг атомного ядра L_e . Тогда выражение (1.2) запишем в виде:

$$\mu_e = \frac{e}{T m_e} L_e \quad (1.2)$$

Отношение орбитального магнитного момента электрона к его механическому моменту является постоянной величиной и не зависит ни от частоты вращения электрона вокруг ядра, ни от радиуса его орбиты.

Автоматизированный измерительный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии применяется для исследования влияния внешних воздействий на импедансные свойства магнитомягких материалов. Комплекс позволяет исследовать в широком частотном диапазоне совместное влияние на импеданс образцов, его активную и реактивную компоненты внешнего магнитного поля, температуры, упругих растягивающих напряжений и подмагничивающего тока.

Автоматизированный комплекс магнитоимпедансной спектроскопии разработан для изучения совместного влияния магнитного поля, упругих напряжений, температуры и подмагничивающего тока на импеданс аморфных и нанокристаллических. (рис. 1). Измерительный комплекс может быть использован для исследования МИ-эффекта как в магнитомягких проволоках и фольгах, имеющих широкое практическое применение, так и в материалах другой геометрии. Комплекс обладает следующими возможностями и характеристиками.

1. Измерение импеданса и его компонент от 10 МОм до 40 МОм в диапазоне частот переменного тока от 40 Гц до 110 МГц в режиме стабилизации по току с возможностью установки его значения от 200 мкА до 20 мА. Погрешность измерения импеданса определяется его величиной и соответствующей частотой переменного тока и составляет от 0,1 до 3 %.
2. Измерение электросопротивления от 0,01 Ом до 100 МОм на постоянном токе с погрешностью от 0,05 до 0,1 %.
3. Изменение напряженности внешнего магнитного поля, воздействующего на образец, в диапазоне от 0 до 150 Эс с погрешностью установки 1 %.

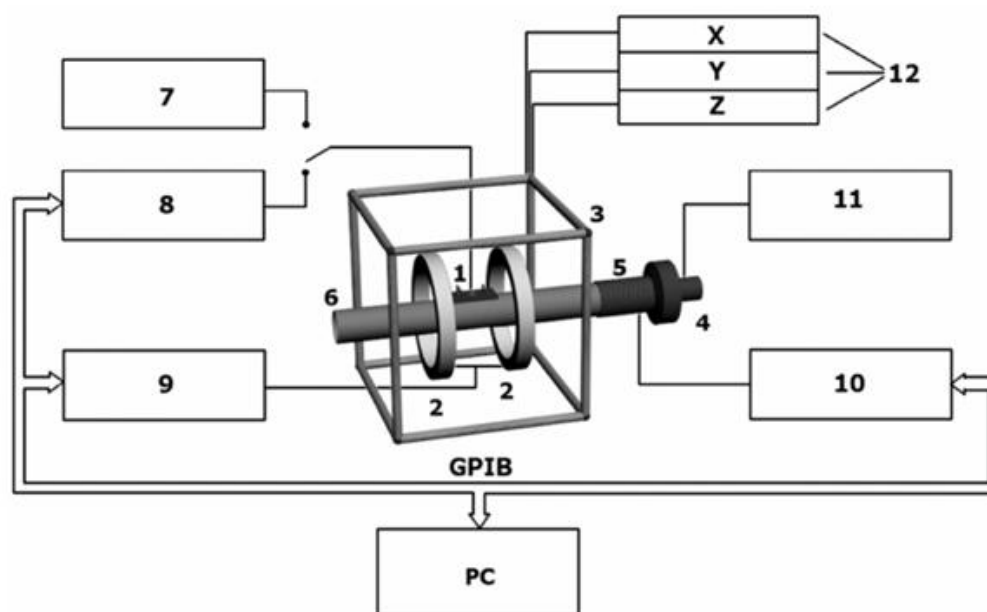


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса магнитоимпедансной спектроскопии: 1–измерительная ячейка; 2–перемагничивающее устройство; 3–

компенсационная система; 4–нагнетатель воздуха; 5–нагревательный элемент; 6–воздуховод; 7–блок измерения электросопротивления образцов на постоянном токе; 8–анализатор импеданса; 9–источник питания перемещающего устройства; 10–источник питания нагревательного элемента; 11–источник питания нагнетателя воздуха; 12–источники питания компенсационной системы

4. Варьирование температуры образца в диапазоне от 20 до 400 °С с точностью установки $\pm 0,5$ °С (с возможностью расширения температурного диапазона от –60 до 500 °С).

5. Создание механических напряжений внешней силой до 10 Н в измерительной ячейке, адаптированной для исследований проволок и фольг сечением от 10–6 до 10–9 м2. Немаловажной особенностью комплекса является возможность автоматической компенсации собственного импеданса измерительной ячейки 1 (см. рис. 1). Необходимость данной операции обусловлена тем, что собственный импеданс измерительной ячейки и соединительных проводов возрастает с увеличением частоты переменного тока, что на высоких частотах может существенно повлиять на результат измерений. Условно комплекс можно разделить на несколько функциональных частей. Основой измерительной части комплекса является прецизионный анализатор импеданса Agilent 4294A. Она также включает блок измерения электросопротивления образцов на постоянном токе. Ввиду того что при закреплении образца в измерительной ячейке с использованием пайки возможно изменение его структуры, а применение токопроводящих клеев не обеспечивает требуемой механической прочности, закрепление образца в контактах измерительной ячейки производится механически. Контакты ячейки изготовлены из посеребренной латуни, что обеспечило их малое удельное сопротивление, достаточно высокую стойкость к окислению при нагреве и механическую прочность. Основание ячейки изготовлено из микаלקса, обладающего требуемыми прочностью, термостойкостью и диэлектрическими свойствами.

К воздействующей части относятся перемещающее и деформирующее устройства и термоблок. Исполнительный механизм деформирующего устройства позволяет воздействовать на образец дискретно изменяющейся аксиально направленной внешней силой. С этой целью для создания растягивающих напряжений один из контактов измерительной ячейки закреплен на ее основании неподвижно, другой контакт имеет шарнирное соединение с основанием ячейки. Максимальное значение воздействующей внешней силы ограничено конструкцией ячейки и равно 10Н. Дискретность изменения внешней силы – 0,01 Н.

Для создания внешнего квазистатического магнитного поля используется пара колец Гельмгольца (2), в центре которых располагается измерительная ячейка (1) с образцом (см.рис.1). Питание данного перемещающего устройства осуществляется от программируемого источника тока (9) с возможностью изменения полярности напряжения. Кольца Гельмгольца снабжены поворотным механизмом, позволяющим изменять угол между вектором напряженности внешнего магнитного поля и осью образца в диапазоне от 0 до 180°, а при проведении температурных исследований–в диапазоне 0–35°. Так как исследуемые материалы относятся к магнитомягким, при их изучении необходима компенсация геомагнитного и техногенного магнитного полей. Для этого используются компенсационная система (3), состоящая из трех пар катушек,

расположенных в ортогональных плоскостях. Питание каждой пары катушек осуществляется от отдельного источника (12) (см. рис. 1). Источник постоянного тока, используемый совместно с анализатором, позволяет проводить исследования влияния на импеданс постоянного подмагничивающего тока, протекающего по образцу. Максимальная величина подмагничивающего тока составляет 100 мА.

При проведении температурных исследований для уменьшения воздействия электромагнитных полей от теплоисточников необходимо разместить их на максимально возможном расстоянии от исследуемого образца и ограничить их тепловое воздействие областью размещения измерительной ячейки. При использовании радиационного нагрева выполнение этого условия затруднительно. Также при использовании такого вида нагрева ввиду малых размеров исследуемых образцов процесс измерения температуры образца и контроль равномерности его нагрева проблематичны. Поэтому для проведения температурных исследований магнитоимпеданса был выбран способ нагрева образца потоком воздуха заданной температуры. Для проведения данных исследований в комплексе предусмотрен термоблок, состоящий из нагнетателя воздуха (4), нагревательного элемента (5) и теплоизолированного воздуховода (6) (см. рис. 1). Воздух с помощью нагнетателя продувается через нагревательный элемент и воздуховод. Нагнетатель и нагревательный элемент вынесены за пределы магнитной компенсационной системы. Измерительная ячейка располагается на воздуховоде таким образом, что образец находится в центре потока нагретого воздуха соосно с ним. Дюралюминиевый воздуховод также выполняет функцию защитного экрана от электромагнитных полей. Температура воздуха и скорость его потока регулируются источниками питания нагревательного элемента (10) и нагнетателя воздуха (11) (рис. 1). Для контроля температуры образца используются два термоэлектрических преобразователя ТХК-типа. Рабочие спайтермопреобразователей располагаются в непосредственной близости от концов образца. Так как длина исследуемых образцов может достигать нескольких сантиметров, скорость потока воздуха подбирается таким образом, чтобы градиент температуры вдоль образца был минимален. Сигнал с термопреобразователей фиксируется и оцифровывается с помощью АЦП (термопреобразователи и АЦП на рисунках не показаны).

Для автоматизации процесса измерений было разработано специальное программное обеспечение. Анализатор импеданса (8), источники питания перемещающего устройства (9) и нагревательного элемента (10) соединены с персональным компьютером по интерфейсу GPIB, АЦП по интерфейсу PCI. Разработанная управляющая программа позволяет устанавливать следующие параметры эксперимента: – частотные диапазоны переменного тока, протекающего по образцу, и шаг изменения в каждом из диапазонов; – амплитуду переменного тока; – величину и направление подмагничивающего постоянного тока; – диапазоны изменения внешнего магнитного поля и шаг изменения в каждом из диапазонов; – временную зависимость изменения магнитного поля; – температуру образца и ее временную зависимость.

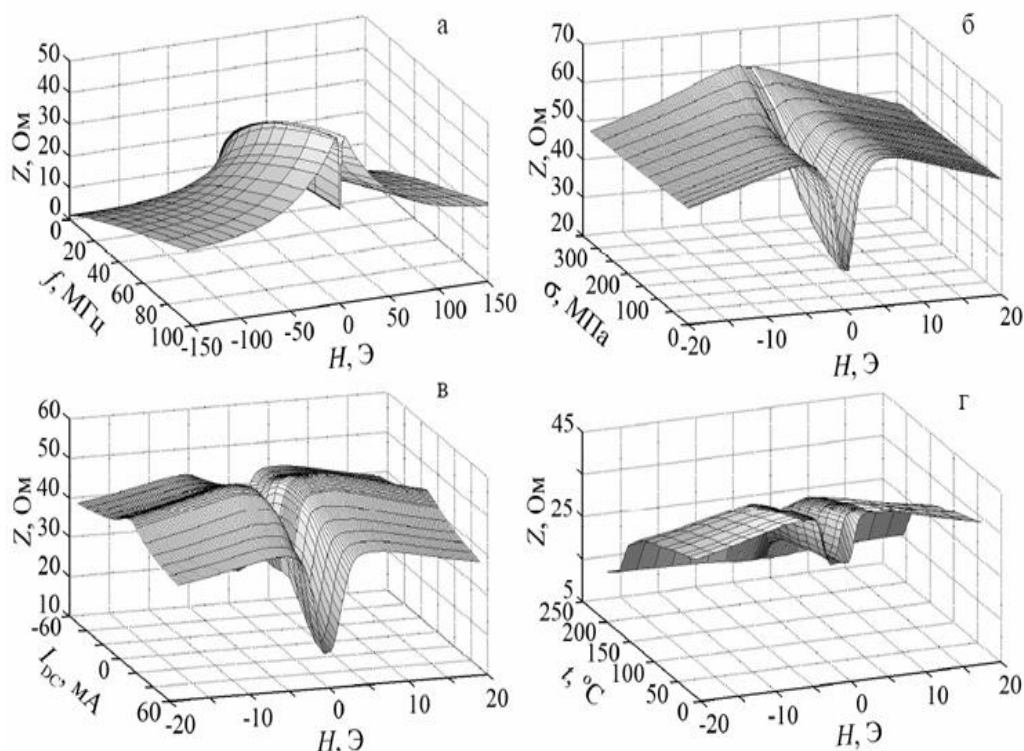


Рис. 1. Зависимость импеданса Z аморфных проволок на основе кобальта от внешнего магнитного поля H . Варьируемые параметры: а – частота переменного тока f ; б – упругое напряжение σ ; в – подмагничивающий ток I_{DC} ; г – температура t

Для визуального контроля процесса измерений в программе предусмотрена возможность построения в реальном времени на мониторе ПК зависимости импеданса от внешнего магнитного поля в виде графика. Все параметры эксперимента и результаты измерений сохраняются на жесткий диск ПК. Полученный массив данных позволяет проводить комплексный анализ зависимостей импеданса и его компонент от частоты переменного тока f , внешнего магнитного поля H , упругих растягивающих напряжений σ , величины подмагничивающего тока I_{DC} и температуры t (рис. 1).

В статье рассмотрены физические основы и модельные представления процессов, определяющих магнитные свойства твердых тел. Особое внимание при этом уделено вопросам, связанным с процессами формирования и изменения доменной структуры ферромагнитных материалов, а также наблюдаемым в них магнитоупругим, гальваномагнитным и магнитоимпедансным эффектам. Кроме того, в статье описаны некоторые современные методы изучения магнитных характеристик ферромагнитных материалов и представлены лабораторные установки по исследованию динамики движения доменных границ, магнитных, магнитоупругих, магнитоимпедансных свойств ферромагнетиков, а также установка для проведения термомагнитной обработки ферромагнитных образцов.